

线栅型圆锥单极天线

张晓刚, 纪奕才, 田步宁, 刘其中

(西安电子科技大学 天线与电磁散射研究所 陕西 西安 710071)

摘要: 研制了一种由导线栅构成的圆锥单极子天线. 采用矩量法来求电场积分方程, 天线表面上的感应电流分布采用正弦插值基函数来展开, 该基函数对于长线结构具有较快的收敛性. 分析了天线的电压驻波比和增益随着线栅根数以及天线高度等参数变化的特性. 设计了一副在 6 个倍频的频带内均可满足电压驻波比小于 2.0, 增益大于 4.5 dB 的全向宽带小型化圆锥单极天线. 理论计算结果与测量结果吻合良好.

关键词: 线栅型圆锥单极天线; 矩量法; 宽带

中图分类号: TN822⁺.8; TN823⁺.15 文献标识码: A 文章编号: 1001-240X(2002)06-0756-04

Analysis of conical monopole antennas

ZHANG Xiao-gang, JI Yi-cai, TIAN Bu-ning, LIU Qi-zhong

(Research Inst. of Antennas and EM Scattering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The conical monopole antenna composed of equally-spaced wire radiating elements is analyzed. The moment method is used to solve the electric field integral equation (EFIE). The current on the antenna is expanded in a sum of sinusoidal interpolation basis functions, which have been shown to provide rapid solution convergence, particularly on longer wires. The characteristics of VSWR and the gain of the antennas with different numbers of wires and different heights are analyzed. Finally, a 6:1 bandwidth, omnidirectional, miniature conical monopole antenna, with the VSWR less than 2.0 and the gain greater than 4.5, is designed. The calculated data is in good agreement with the experimental data.

Key Words: conical monopole antenna; moment method; broadband

近几十年来, 随着军事保密通信技术中的跳频扩频技术的快速发展, 跳频电台的跳频速率达到每秒几千次, 跳频的宽度也越来越宽, 对电子设备提出了更高的宽带化要求. 天线作为辐射和接收电磁波的关键部件, 其工作带宽的大小将直接影响上述技术的应用与发展. 因此, 研制宽带天线成了越来越迫切的任务^[1]. 展宽天线工作带宽的方法有多种, 其中之一是采用较大锥角的圆锥天线. 所谓圆锥单极子天线就是用倒立的圆锥代替直立在地面上的导线而成的天线. 当这种圆锥天线的锥角比较大时, 便具有良好的宽频带特性^[2]. 一般的圆锥天线是由金属圆锥体或圆锥面构成, 为了减轻天线的重量及易于工程制作, 也常采用导线栅来代替圆锥的导体面^[3~6], 即线栅型圆锥天线. 以往的圆锥天线的设计多采用估算和实验调整, 为了在很宽的频带范围内同时满足驻波和增益指标, 其设计过程冗长甚至反复, 这样会造成时间和资源的极大浪费. 采用精确可靠的数值计算方法可以避免这一问题. 笔者采用矩量法^[7]来快速精确分析线栅型圆锥天线的电特性, 计算了其电压驻波比和增益特性, 并选定合适的结构加工了一副天线, 测量了该天线的驻波与增益, 计算值与实验值吻合良好.

1 圆锥单极子天线的几何结构及矩量法建模

线栅型圆锥单极子天线的几何结构如图 1 所示,圆锥面由线栅条组成,圆锥顶端圆圈的半径为 b ,圆锥的半锥角为 θ_0 ,圆锥高度为 h ,组成锥面的导线半径为 a ,长度为 s .

设外加场为 $E^i(r)$,在天线表面 S 上产生感应电流 J_s 和电荷 σ ,再由 J_s 和 σ 形成辐射,辐射场可表示为

$$E^s(r) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_V J(r') \cdot \bar{G}(r, r') dV' \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} \bar{G}(r, r') &= (k^2 \bar{I} + \nabla \nabla) g(r, r') \quad , \\ g(r, r') &= \exp(-jk|r-r'|)/|r-r'| \quad , \\ k &= \omega(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2} \quad , \quad \eta = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2} \quad , \\ \bar{I} &= \hat{e}_x \hat{e}_x + \hat{e}_y \hat{e}_y + \hat{e}_z \hat{e}_z \quad . \end{aligned}$$

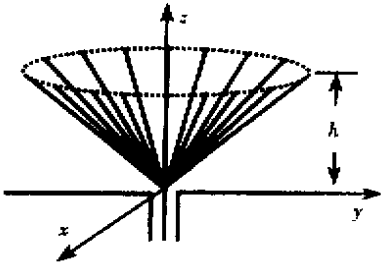


图 1 线栅模型圆锥单极子天线

利用细线近似^[7]以及理想导体的电场边界条件,式(1)可变为

$$-\hat{s} \cdot E^i(r) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_L K(s') \cdot \left(k^2 \hat{s}' \cdot \hat{s} - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'} \right) g(r, r') ds' \quad (2)$$

式(2)便为要求电流的电场积分方程(EFIE).由于 r' 是位于轴线 s' 上的点而 r 是导线表面 s 上的点,所以有 $|r-r'| \geq a$ 且积分项有界.

采用矩量法进行求解时,首先将天线分成若干段,然后选用合适的基函数,并将线上电流 $K(l)$ 展开成这些基函数的叠加.在线上笔者采用的展开函数为正弦插值基函数

$$I(s) = A_i + B_i \sin k(s-s_i) + C_i \cos k(s-s_i), \quad |s-s_i| \leq \Delta_i/2 \quad (3)$$

式中的 s_i 为第 i 段中心的 s 值, Δ_i 为第 i 段的长度.这种基函数对线结构特别是长线结构具有较快的收敛性^[8,9].

下面将通过图 2 所示导线段结构推导基函数的一般形式.在第 i 段上的基函数延伸到所有与该段相连的各段上,并且在这些段的外侧趋于零且导数为零.因此其形式可以认为是广义 B-样条函数.在每段上的电流具有式(3)的形式,因此 i 段上的电流可表示为

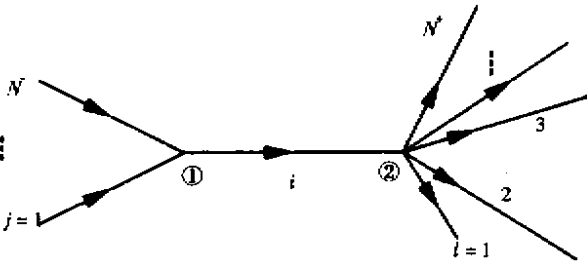


图 2 第 i 个基函数所包含的导线段

$$\begin{aligned} f_i^0(s) &= A_i^0 + B_i^0 \sin k_s(s-s_i) + \\ &C_i^0 \cos k_s(s-s_i), \quad |s-s_i| < \Delta_i/2 \quad . \end{aligned} \quad (4)$$

而与第 i 段的 1 端连接的导线段电流

$$f_j^-(s) = A_j^- + B_j^- \sin k_s(s-s_j) + C_j^- \cos k_s(s-s_j), \quad |s-s_j| < \Delta_j/2 \quad , \quad (5)$$

且 $j = 1 \dots, N^-$, 与第 i 段的 2 端连接的导线段电流

$$f_l^+(s) = A_l^+ + B_l^+ \sin k_s(s-s_l) + C_l^+ \cos k_s(s-s_l), \quad |s-s_l| < \Delta_l/2 \quad , \quad (6)$$

且 $l = 1 \dots, N^+$.在节点上的电流满足基尔霍夫定律,那么对具有 N 段线结构的总电流展开式

$$K(s) = \sum_{i=0}^N \alpha_i f_i(s) \quad , \quad (7)$$

$$\text{式中第 } i \text{ 段中心的基函数} \quad f_i(s) = f_i^0(s) + \sum_{j=1}^{N^-} f_j^-(s) + \sum_{l=1}^{N^+} f_l^+(s) \quad , \quad (8)$$

且第 i 段上基函数的各分量由式(4)~(6)给出.

方程(4)~(6)形成了与第 i 段相关的完整基函数,它们一共包括 $3(N^- + N^+ + 1)$ 个系数,但其中只有一

个系数不能通过在导线段末端对电流及其导数加边界条件消去,而这一个系数便可通过解矩阵方程得到.

将上述电流展开并代入电场或磁场积分方程中,采用点选配的方法进行检验,就得到了一个矩阵方程,求解该矩阵方程就可得到天线上的电流展开系数,进而可得到导线上的电流、周围的近场、天线输入阻抗、驻波比和远场方向图及增益等参数.

2 数值计算与结果

用矩量法设计一副工作在 400~2500 MHz 的圆锥单极子天线,要求其电压驻波比 $R_{VSW} < 3.0$,增益 $G > 3.0$ dB.选取天线结构时取导线根数大于 16 根,圆锥半锥角为 45° ,天线的高度则以频率低端所对应波长的 0.25 倍为标准取值试算.首先验证矩量法对天线分段计算时的收敛性,图 3 绘出了天线的输入阻抗随组成锥面的导线分段数变化的曲线图.从图 3 可以看出天线的输入电抗随导线分段数变化不大,当分段数大于 15 时,天线输入阻抗的收敛性已经很好了.

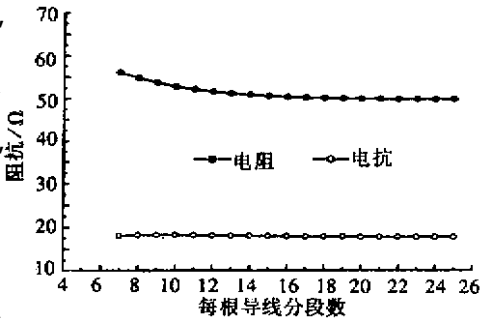


图 3 天线输入阻抗随每根导线的分段数变化图

下面分析不同高度的圆锥天线在构成其锥面的导线栅分别为 16 20 28 根时的驻波及增益随频率变化的特性.由图 4 和图 5 可以看出,在圆锥高度和锥角一定时,组成锥面的导线栅越多,天线的驻波与增益值就越好.

图 6 和图 7 分别给出了圆锥高度分别取 18.25 cm,17.25 cm,16.25 cm 时驻波和增益图.从图 6 可以看出天线的驻波都在 2.5 以下,在频率的高端与低端当 $h = 18.25$ cm 时天线的驻波稍好,但由图 7 看出, $h = 18.25$ cm 时天线的增益在频率高端比较差.

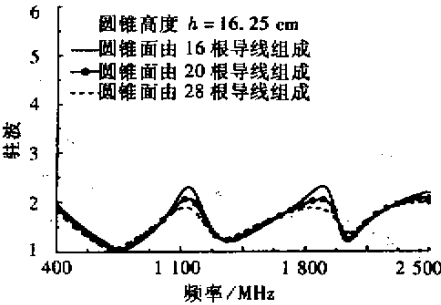


图 4 构成圆锥面的导线根数不同时天线的驻波比较曲线

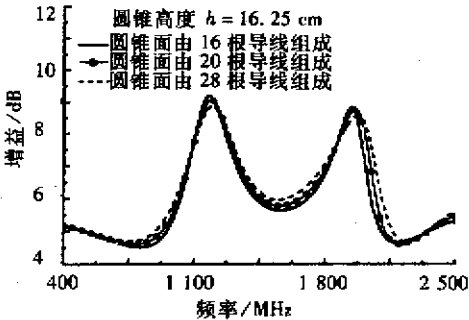


图 5 构成圆锥面的导线根数不同时天线的增益比较曲线

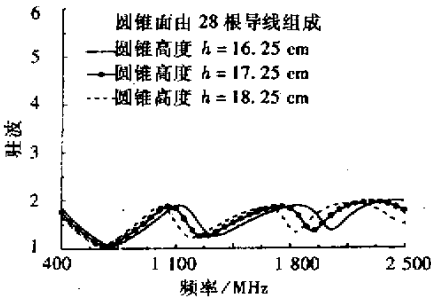


图 6 天线高度不同时天线的驻波比较曲线

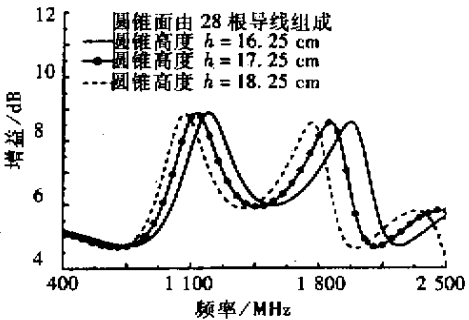


图 7 天线高度不同时天线的增益比较曲线

根据以上的数值分析结果并考虑到易于天线加工,选定天线结构为:圆锥面由 20 根线栅组成,天线高度 $h = 16.25$ cm.实地加工并测量了该天线的驻波比及增益,如图 8 和图 9 所示,整个频带内 $R_{VSW} < 2.0$,增益 $G > 4.0$,并且实验结果与计算值吻合较好,达到了设计要求.

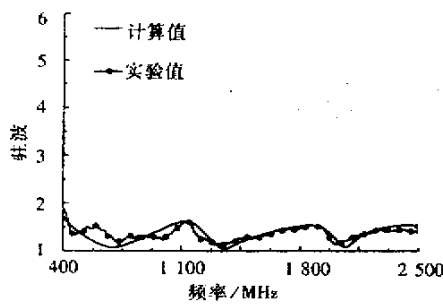


图 8 天线驻波比的计算值与实验值比较曲线

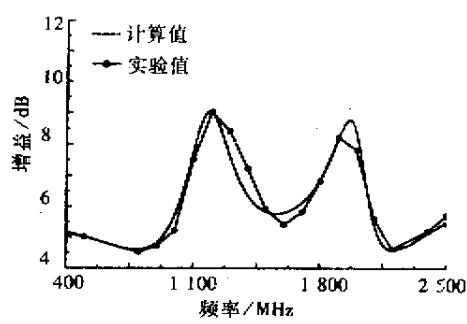


图 9 天线增益的计算值与实验值比较曲线

3 结 论

采用矩量法研究了由导线栅构成的圆锥单极子天线.数值结果显示,在锥角和高度一定时,组成天线的导线栅数目越多,天线的电特性越好;同时,为了在较宽的频带内得到较好的增益特性,需要选择合适的天线高度.在此基础上,笔者成功地设计了一副工作在400~2500 MHz上的圆锥天线,验证了上述方法的有效性及实用性,克服了单纯实验调整的难度,可以用来快速精确设计宽频带的线栅型圆锥天线.

参考文献:

[1] 康行健. 天线原理[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
[2] 王元坤,李玉权. 线天线的宽频带技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1995.
[3] Sandler S S, King R W P. Compact Conical Antennas for Wide-Band Coverage[J]. IEEE Trans on AP, 1994, 42(3):436-439.
[4] Samaddar S N, Mokole E L. Biconical Antennas with Unequal Cone Angle[J]. IEEE Trans on AP, 1998, 46(2):181-193.
[5] Givati O, Fourie A P C. Analysis of Skeletal Wire Conical Antennas[J]. IEEE Trans on AP, 1996, 44(6):844-858.
[6] De N C, Ghosh T K, Poddar D R, et al. Design and Experimental Investigation of the Asymptotic Conical Dipole Antenna[J]. IEEE Trans on AP, 1995, 37(2):282-285.
[7] Harrington R F. Field Computation by Momen[M]. Malabar, FL:Krieger, 1982.
[8] 陈胜兵. 基站分集天线耦合影响的矩量法分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2001.
[9] 孙保华,刘其中. 一种有效提高天线矩量法计算速度的新方法[J]. 西安电子科技大学学报,2001,28(4):487-491.

(编辑:郭 华)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>